

TRAUBESche - PFEFFERSche Zelle – STOYE-Osmometer

Diffusion – Permeation – Konzentration – Konfusion Didaktische Anmerkungen

Manfred Hesse

Kurzfassung

Die Darstellung osmotischer Vorgänge, ihrer theoretischen Grundlage und die Beziehung zum derzeitigen Wissen über Membranen wurde didaktisch analysiert.

Schwierigkeiten, die Lernende mit dem Themenkomplex haben, könnten begründet sein in unzulänglichen, widersprüchlichen Abhandlungen in den Lehrbüchern, insbesondere in:

- ♦ Ungenauigkeiten bei Teilchen- und Porenvorstellungen,
- ♦ inkonsequenter Begrifflichkeit,
- ♦ verwirrenden Termini,
- ♦ fehlendem Konzept bei der Vereinfachung der Thematik,
- ♦ überbetonter Mathematisierung,
- ♦ fehlender Anschaulichkeit,
- ♦ problematischen Modellen (Darstellung und Interpretation).

Die Analyse dient als Grundlage einer empirischen Untersuchung von Schülervorstellungen und von Konzepten bei Biologielehrern.

1 Einleitung

Wenn man sich viele Jahre lang mit Zellbiologie und Pflanzenphysiologie beschäftigt hat, fällt zweierlei zu dem obigen Themenkomplex auf. Erstens, wie unterschiedlich die Inhalte in den verschiedenen Lehrbüchern behandelt werden, und zweitens, welche Schwierigkeiten Studenten haben, eine treffende Erklärung der ablaufenden Vorgänge zu geben. Dies zwingt zu einer Überprüfung der Ziele, die mit diesem Themenkreis erarbeitet werden sollen. Hierbei kommen Zweifel an der derzeitigen Vermittlung auf. Es entsteht der Eindruck, als ob tradierte Inhalte, ausufernde Darstellung, Mathematisierung, nebensächliche

Daten sowie auch unreflektierter historischer Kontext die Kernaussagen verdrängen.

Kurz gesagt stellt sich die Frage nach dem „Was“, dem „Warum“ und dem „Wie“, also Fragen bezüglich der didaktischen Bewertung von Inhalten. Ein besonderer Anstoß kam aus der RÜTHERschen Arbeitsgruppe¹, in der ein neues Modell entwickelt wurde, welches das klassische PFEFFERSche Modell ersetzen kann (BARTSCH et al., 1990). Sakrileg oder Notwendigkeit?

Die PFEFFERSche Zelle ist laut ‚STRASBURGER‘ (1962, 194) konstruiert worden, um im Modell „eine Erklärung für die in Pflanzenzellen stets zu beobachtenden hohen Drucke zu finden“. Nach PFEFFER selber diene es dazu, die „besonderen diosmotischen Eigenschaften“ entweder als „eine Funktion der ganzen Protoplasamasse“ (von NÄGELI vertreten) oder in der diosmotischen „Durchwanderung von einer resp. von zwei Plasmamembranen“ aufzudecken (PFEFFER, 1881, 38, 41). Schon einleitend soll festgehalten werden, dass das neue Modell zutreffender ist, um osmotische Vorgänge an einer Pflanzenzelle zu veranschaulichen, als die PFEFFERSche Zelle oder das STOYE-Osmometer (s. hierzu GÜNZLER, 1977). Darüber hinaus ist auch die Plasmolyse mit diesem Modell demonstrierbar. Die Notwendigkeit für diese Neuentwicklung und für kritische Diskussion bestehender Modelle sehen die Autoren in den Schwierigkeiten, welche Lernende mit der Erklärung der Phänomene Diffusion, Osmose, Plasmolyse und Turgor haben. Als besondere Probleme werden aufgeführt:

- Facheigenes Begriffssystem bei Biologen und Chemikern;
- erforderliches abstraktes, modellhaftes Denken;
- molekulare Ebene der dynamischen Prozesse;
- Mathematisierung als Erklärungsversuch.

Bei BARTSCH et al. (1990) wird auf Grund der Themenstellung vorwiegend auf die Teilchen- und Modellebene eingegangen. So konnten naturgemäß weitere Probleme nicht hinreichend diskutiert werden: Vor allem gehören hierzu Fragen nach der Bedeutung der genannten Phänomene im Hinblick auf das moderne Verständnis von Zellmembranen, nach der Begrifflichkeit und nach der statistisch-mathematischen Beschreibung der Dynamik.

¹ Diese Publikation ist Herrn Prof. Dr. Rütther, Bonn, zum 75. Geburtstag gewidmet.

2 Didaktische Analyse

2.1 Vorüberlegungen – Sachanalyse

Welche allgemeinen Ziele verbindet man mit dem Themenkomplex „Membran“?

- ◆ Es sollen spezifische Vorgänge in und an Membranen aufgezeigt werden: a) Transport und Transport-Regulationen, b) trennende Funktionen, c) Kommunikation und d) Zellidentifikation (z.B. AUDESIRK & AUDESIRK, 1996, 106), e) enzymatische Reaktionen, f) Anker für Cytoskelett (u.a. KOOLMAN & RÖHM, 1994, 205).

Welche konkreten Ziele werden mit dem Aspekt (a) verbunden, dem Transport?

- Wassertransport; †Ausblick: Ökologie (Wasseraufnahme bei Pflanzen in Trockengebieten, Ökonomie des Wasserhaushaltes); Alltagserscheinungen (Welken).
- Substrattransport (Anreicherung; Besonderheiten bei Ionen); †Ausblick: Dialyse bei der Niere; Ethernarkose.
- Energietransport in und über Membranen; †Ausblick: Elektronen- und Protonentransport.

Welche Bedeutung hat das Osmometer heute?

- Osmometer veranschaulichen nur (im Sinne von eingeschränkt!) den Übertritt von Wasser über Membranen und (für Pflanzen) den Turgor; hierbei ist die Konzentrationsabhängigkeit nachweisbar.

Welche grundlegenden Einsichten bzw. theoretischen Grundlagen stecken ‘offen‘ oder ‘verborgen‘ in dem Osmometer-Modell?

- Teilchenvorstellung und Kontinuum (es gibt kein Kontinuum an Materie!);
- ungerichtete, zufällige Einzelbewegung von Teilchen führt in der Summe zu einer gerichteten, messbaren Bewegung;
- Nettoflux und Gleichgewichtsreaktionen;
- Terminologie und Begriffsdefinition fördern das Begreifen;
- Bau und Funktion als ein Basiskonzept der Biologie.

Welche Inhalte – in der Sache selbst oder in Texten und Abbildungen – verhindern, die soeben genannten Ziele und Einsichten zu erwerben, lassen Schwierigkeiten für das Verständnis entstehen?

- ◆ Notwendig ist eine Analyse der Fehlvorstellungen und Missverständnisse beim Lernenden, der falschen, ungewichteten oder unvollständigen Dar-

stellungen in Lehrbüchern und der unzulänglichen Vermittlung durch Lehrende.

2.2 „Fehler“analyse

Es kann derzeit keine empirische Untersuchung an Schülern oder Studierenden vorgelegt werden, sondern lediglich eine eigene Sammlung häufiger Fehler oder Missverständnisse aus Klausuren:

Bei der Erklärung von Diffusion und Osmose...

- ◆ wurde die Terminologie nicht erfasst (Unterschiede, Gemeinsamkeiten bei den Begriffen),
- ◆ wurde die BROWNSche Molekularbewegung nicht als gemeinsame Grundlage erkannt bzw. war unbekannt.

Die PFEFFERSche Zelle...

- ◆ ‚verdeutliche den Vorgang der Plasmolyse‘,
- ◆ ‚habe eine semipermeable Membran im Vergleich zu Osmometern‘.

Den Flüssigkeitsübertritt über Membranen...

- ◆ ‚nenne man Plasmolyse‘,
- ◆ schilderten Studierende vereinfacht und verfälschend nur als ‚Nettoflux‘.

Bei der Erklärung der Plasmolyse (bzw. im Verständnis der hierbei ablaufenden Vorgänge) ...

- ◆ blieb die ‚stoffliche Komponente‘ in dem Raum zwischen Plasmalemma und Wand unklar,
- ◆ wurde diese mit der Wasseraufnahme in der Wurzel in Verbindung gebracht.

Fehlvorstellungen oder verkürzte Darstellungen treten auch in den Büchern für die Sekundarstufe II auf. Vielfach wird deutlich, wie schwierig eine korrekte Darstellung bei dem begrenzten (!) Umfang eines Schulbuches ist und wie schwer sich einzelne Autoren mit dem Thema getan haben.

Zur Plasmolyse:

- ◆ „Dann löst sich das Plasma mit seiner begrenzenden Membran von der Zellwand ab und legt sich als Plasmahülle um die geschrumpfte Vakuole. Diesen Vorgang nennt man Plasmolyse.“ (BAUER & BOSSLER, 1980, 52).
- ◆ „Wenn der hydrostatische Druck den osmotischen Druck kompensiert, ändern sich die Konzentrationen auf beiden Seiten der Membran nicht mehr. Mit Hilfe dieser Überlegungen lässt sich der Plasmolysevorgang erklären. Danach ist die Plasmolyse ein osmotisches Phänomen, bei dem das Kon-

zentrationen zwischen einem hypotonischen Zellinnern und einem hypertotonischen Plasmolytikum besteht. Aus der Zelle wird solange Wasser austreten, bis das Diffusionsgleichgewicht erreicht ist.“ (DEMME & THIES, 1979, 19).

- ◆ „Da sich beim Schrumpfen der Vakuole das Protoplasma von der Zellwand abhebt, muss die halbdurchlässige Membran das Plasmalemma sein. Dagegen ist die Zellwand ... durchlässig.“ (LINDER, 1983, 130 und 1998, 51); der Tonoplast wurde vergessen.

Zum Stofftransport:

- ◆ Abschließend steht im LINDER unter dem Abschnitt „5.4.2 Osmose“: „Allerdings können Zellen diese Vorgänge für den Stofftransport nur deshalb nützen, weil die Zellen sehr klein sind; über größere Strecken verläuft die Diffusion zu langsam.“ (LINDER, 1983, 47f.); hierbei wurde Stofftransport unnötigerweise mit Osmose in Verbindung gebracht.

Zur Osmose und zu dem osmotischen Druck:

- ◆ „Diffusion durch eine semipermeable Membran heißt Osmose.“ (LINDER, 1983, 47); dass Wasser und nicht andere Substanzen gemeint sind, steht zwischen den Zeilen; in der aktuellen Ausgabe (1998, 32) leicht verändert.
- ◆ „Diesen maximalen, am Steigrohr ablesbaren Druckwert bezeichnet man als den osmotischen Druck der Lösung. ... Zu- und Abnahme des Turgors in den Schließzellen setzen voraus, dass zuvor die osmotische Saugkraft der Zellen zu- bzw. abnimmt.“ (SCHARF & WEBER, 1997, 36 bzw. 37).

Fazit: Es wird deutlich, dass kleinere Schwierigkeiten bei der Formulierung bis hin zu gravierenden Fehlvorstellungen sowohl bei den Lernenden als auch bei der Vermittlung der Inhalte auftreten. Eine systematische Erfassung und Bearbeitung dieser Vorstellungen ist unumgänglich, um weitere Grundlagen für die **Strukturierung des Themenkomplexes** zu erhalten; diese Analyse (sowie diejenige der Situation des Lehrers) ist Gegenstand derzeitiger Untersuchungen.

3 Wie werden die grundlegenden Einsichten und Begriffe in der Fachliteratur dargestellt?

Zur Gewinnung eines Überblicks wurde die Thematik in Lehrbüchern für die universitäre Biologenausbildung erfasst. Als Kriterien für die Auswahl an Begriffen und Begriffsnamen wurden die Überlegungen von BERCK (1999, 79-92) und KATTMANN (1992, 199) herangezogen. Für die Modellbildung wurde geprüft, ob für sinnvolle und korrekte Modellbildung notwendige Kriterien in textlicher Darstellung und in den Abbildungen beachtet worden sind.

In analoger Weise wurden Inhalte der Schulbücher der Sekundarstufe II bezüglich der herausgearbeiteten Schlüsselkonzepte analysiert.

3.1 Osmometer oder PFEFFERSche Zelle

Der Terminus Osmometer wird nicht immer definiert; es wird erwartet, dass er sich letztlich aus dem Zusammenhang textlicher Erläuterungen erschließt. Dass dies nicht uneingeschränkt erwartet werden kann, zeigt der folgende Abschnitt: Nach korrekter Definition des Osmometers (SCHARF & WEBER, 1997) findet sich die (verwirrende) Gegenüberstellung: „Aufgabe: Vergleichen Sie anhand der Abb. 39.1 PFEFFERSche Zelle und Osmometer miteinander.“

Bei der Herstellung einer PFEFFERSchen Zelle bildet sich **in** der Wand des Tonzylinders nach gleichzeitiger Diffusion von Teilchen aus dem Innern des Zylinders und aus dem Außenmedium eine Niederschlagsmembran. An dieser Lage ist ein wichtiger Kritikpunkt an dem Modell selber festzumachen: Nimmt man die PFEFFERSchen Zelle als Modell für die Pflanzenzelle, so entspricht die Lage der Membran, also ein *wesentliches* Merkmal, nicht dem Original. Ein Wunschtraum ist daher die Zeichnung bei CZIHAK et al. (1990, Abb. 1.48), in der diese Membran eine Plasmalemma-ähnliche Lage einnimmt.

Bei SCHOPFER & BRENNICKE (1999) fehlt in der Abbildung der PFEFFERSchen Zelle (Abb. 3.4) eine Unterscheidung von Tonzylinder und Membran; eine kritische Diskussion der Anwendung des Modells auf die Pflanzenzelle wird somit hinsichtlich der Zellwand („Diffusionsraum“) und Membran erschwert.

Strukturierung: Die PFEFFERSche Zelle ist ein Osmometer und sollte so definiert werden. Das Erarbeiten von Stärken und Schwächen eines Modells ist ein Lernziel.

3.2 Teilchenvorstellung und Poren

Grundlage für die Diffusion ist die regellose (thermische oder auch BROWNSche) Molekularbewegung, durch welche ein Ausgleich unterschiedlicher Konzentrationen innerhalb von Gasen, Lösungen oder Festkörpern erfolgt. Bei den Darstellungen hierzu werden jedoch lebensweltliche Vorstellungen mit wissenschaftlichen Konzepten vermischt (Beispiel aus GROPPENGIEBER, 1998, 314): „Aneinandergrenzende unterschiedliche Ionenkonzentrationen streben den Ausgleich durch Diffusion an (...)“ (Dudel 1995, 33).“ Auch der folgende Satz aus GÜNZLER (1977, 139; s. auch CAMPBELL, 1997, 162): „Das Bestreben der Teilchen, einen Konzentrationsausgleich herbeizuführen ...“ beschreibt ‚indirekt‘ ein gerichtetes, aktives Vorgehen der Teilchen. Für Experten ist die Dif-

fusion (trotz derartiger Darstellungen) ohne Einschränkung mit der thermischen Bewegung der Teilchen verbunden, nicht unbedingt aber auch für Lernende.

Die Theorie, die der Modellvorstellung zur Osmose zu Grunde liegt, bezieht sich auf die Teilchenvorstellung und beschreibt den gehinderten oder ungehinderten Durchtritt durch Membranen auf Grund der Porengröße und Wechselwirkungen zwischen Poren und Teilchen. (Modelle s. GROPPENGIEßER, 1981).

Problematische Verwirklichungen in Lehrbüchern:

- ◆ Poren- und Teilchengröße sind dann völlig unzulänglich abgebildet, wenn die Beziehung zwischen beiden – bereits optisch (!) – nicht zu erkennen ist (,STRASBURGER': alle Auflagen von 1978 bis 1998). In der neuesten Ausgabe ist zudem der Tonzylinder rot angefärbt – im Hinblick auf die zu erklärenden Vorgänge (nämlich Einführung in die Osmose) völlig überflüssig.
- ◆ Poren sind in einem Teil der Abbildungen eingezeichnet (z.B. bei der Einführung von Diffusion und Osmose) fehlen dann aber in den folgenden Abbildungen (z.B. bei BARTSCH et al., 1990: Kasten 3: Modellexperiment).
- ◆ Poren sind in den Membranen nicht eingezeichnet (,LINDER', z.B. 1978, 35; bis 1998, 31).

Die gleichzeitige Darstellung von Teilchen und von einem Kontinuum der Materie widerspricht sich. In unserem Fall ist die Teilchenvorstellung (zumindest für das einführende Verständnis²) leicht zu vermitteln: Es gibt Wasserteilchen und Teilchen der gelösten Stoffe, welche erstens die Konzentrationsveränderung herbeiführen und zweitens größer sein müssen als die Wasserteilchen bzw. die Poren. Erstaunlich ist, dass dieser Sachverhalt so wenig korrekt dargestellt wird. Vier Möglichkeiten sind nachzuweisen:

- ◆ Zucker und Wasser werden korrekt als Teilchen dargestellt (BARTSCH et al., 1990, Abb. 2; RAVEN et al., 2000, 87; AUDESIRK & AUDESIRK, 1996, 113).
- ◆ Zucker wird als Teilchen dargestellt, Wasser nicht (CAMPBELL, 1997, 161 und 162; BARTSCH et al., 1990, Kasten 3; SCHARF & WEBER, 1997, 36, 39).
- ◆ Zucker und Wasser werden als Teilchen dargestellt, hinzugefügt wird noch – zur optischen Verschönerung? – ein Kontinuum an Wasser (,LINDER' 1983, 47; bis 1998, 31; LÜTTGE et al., 1994, 66; AUDESIRK & AUDESIRK, 1996, 113, Fig. 6-6(a)).

² Problematischer sind die darüber hinausgehenden Kenntnisse zu vermitteln, die aber für das prinzipielle Verstehen der Membranvorgänge zunächst außer acht gelassen werden können oder – besser – müssen: u.a. Clusterbildung des Wassers, Dissoziation der Teilchen und des Wassers, Hydrathüllen.

- ♦ Weder Zucker noch Wasser werden als Teilchen dargestellt (z.B. in Übersichten: SCHOPFER & BRENNICKE, 1999, 46).

Fazit und Strukturierung: In der Regel ist die Darstellung von Teilchen(größe) und Poren im Text korrekt; die Wahrscheinlichkeit, dass die Abbildungen zu Fehlvorstellungen führen könnten, ist daher eher gering. Es gibt jedoch bei Lernenden Schwierigkeiten bei dem exakten Verständnis von Teilchen und ‚Kontinuum‘ eines Stoffes. Dieses Problem ist im Zusammenhang mit der Beschreibung von chemischen und physikalischen Prozessen als bedeutsam erkannt und diskutiert worden (HÄUBLER et al., 1998, 178f., 216f.).

Ein ‚Bestreben der Teilchen‘ existiert nicht; der Terminus sollte vermieden werden.

3.3 Semipermeable Membran

Dieser Terminus wird seit langem bis in die neuesten Publikationen allgemein verwendet, tritt jedoch noch nicht bei PFEFFER (1881) auf. Das Wort ist problematisch; es wird in der Regel – unanschaulich – mit „halbdurchlässig“ übersetzt³, wobei folgende Begriffszuweisungen zu finden sind:

- ♦ „Nehmen wir nun zunächst an, dass die Membran in Abb. 5-1 (*gemeint ist eine Modellmembran*) für die Teilchen von S (*gemeint ist eine Substanz S*) vollkommen undurchlässig (impermeabel) und für die H₂O-Teilchen vollkommen durchlässig (permeabel), d.h. ideal semipermeabel ist. ... Biologische Membranen sind meist nicht ideal permeabel, sondern haben eine gewisse Durchlässigkeit für gelöste Substanzen“ (LÜTTGE et al., 1994, 66).
- ♦ „Man versteht darunter (*gemeint ist die Wasseraufnahme durch Osmose*) eine Diffusion durch eine semipermeable (oder selektiv permeable) Membran, d.h. eine Membran die für das Lösungsmittel (Wasser) gut, für die gelösten Substanzen aber nicht (oder zumindest schwerer) durchlässig ist.“ (STRASBURGER, 1978, 311, identisch mit 1998, 302).
- ♦ „Viele Membranen haben Poren, die groß genug sind, um einige kleine Moleküle hindurch zu lassen, andererseits aber zu klein sind, um anderen größeren Molekülen den Durchgang zu gestatten. Derartige Membranen werden als semipermeable Membranen bezeichnet. Einige von ihnen lassen Wasser durch, aber keine Salzionen. Andere, mit größeren Poren, lassen Wasser, Salze und kleine Moleküle durch, aber keine Makromoleküle.“ (DICKERSON et al., 1978, 750).
- ♦ „Membranen trennen Zellkompartimente voneinander, aber sie erlauben auch spezifische Verbindungen zwischen Kompartimenten; sie sind also im

³ Was stellt sich ein Schüler oder Studierender darunter eigentlich konkret vor?

strengen Sinne stets selektiv permeabel (,semipermeabel‘).“ (CZIHAK et al., 1990, 59).

- ◆ „Dieser Plasmasack kann ... als selektiv permeabel (,semipermeabel‘) angesehen werden, d.h. er stellt in beide Richtungen eine unbedeutende Diffusionsbarriere für Wasser, hingegen eine sehr hohe Diffusionsbarriere für gelöste Moleküle und Ionen dar.“ (SCHOPFER & BRENNICKE, 1999, 45).
- ◆ „... biologische Membranen sind selektiv permeabel (durchlässig), so dass nicht alle Substanzen sie gleichermaßen passieren können. Die Zelle nimmt bestimmte Moleküle auf und verwehrt anderen den Zutritt.“ (CAMPBELL, 1997, 160, Abb. 8.9. Der Terminus semipermeabel fällt dabei nicht (!), wohl aber mehrfach auf 763ff. und in Abb. 32.3a) – Übersetzungsfehler?)
- ◆ „Eine Membran, die den Durchtritt bestimmter Substanzen ermöglicht und den Durchtritt anderer Verbindungen blockiert, bezeichnet man als selektiv permeabel.“ (RAVEN et al., 2000, 86).

Die Textauszüge sind bewusst umfangreicher gehalten, um aus ihnen folgern zu können, dass eine Entscheidung nötig ist, ob man bei seinen Erklärungen vom Modell ausgehen möchte oder vom Lebewesen (sprich von seinen Zellmembranen). Im ersten Fall spricht man von „ideal semipermeabel“ (z.B. LÜTTGE et al., 66), im zweiten Fall bevorzugen Autoren „selektiv permeabel“ (z.B. CZIHAK et al., 1990; CAMPBELL, 1997).

Der Terminus „semipermeabel“ verstößt gegen folgende Auswahlkriterien:

Zutreffende Bedeutung	– der Name ist nicht sofort verständlich, eher missverständlich; er bezieht sich auf das Modell, nicht auf die Zelle;
Theorieträchtigkeit	– der Name widerspricht der tatsächlichen Selektivität von Membranen;
Einheitlichkeit	– ist (in den Publikationen) nicht mehr gegeben;
Ausbaufähigkeit	– der Name ist eher hinderlich. In welcher Richtung könnte er überhaupt von Nutzen sein?

Strukturierung: Auf den Terminus „semipermeabel“ kann man sehr gut verzichten.

Bei „selektiv“ ist zu betonen, dass alle Stoffe (eine Unterscheidung von Lösungsmittel und gelöstem Stoff ist nicht sinnvoll) mehr oder weniger stark am Durchtritt (in beide Richtungen) gehindert werden. Dies kommt den Vorstellungen zur Membranwirkung am nächsten: ,unbedeutende‘, ,hohe‘, ,sehr hohe‘ Diffusionsbarriere (SCHOPFER & BRENNICKE, 1999, 45; auch GÜNZLER, 1977, 140f.; BAUER & BOSSLER, 1980, 51; AUDESIRK & AUDESIRK, 1996, 111f.).

3.4 Dynamik des Lösungsmittels

Zwei Formen der Dynamik des *Lösungsmittels* an Membranen werden bei CZIHAK et al. (1990, 60f.) unterschieden: „Die Permeation (oder „Diffusion“) und die Osmose. Permeation (Diffusion): Selbst wenn die Konzentration des Wassers zu beiden Seiten der Membran gleich ist, werden Wassermoleküle zwischen den beiden Kompartimenten ständig ausgetauscht.“ Der osmotische Fluss verläuft 1,5-6mal schneller als die Permeation, da „hinter dem osmotischen Fluss die Schubkraft der in Richtung auf die Lösung mit der geringeren Wasserkonzentration nachdrängenden Wassermoleküle steht“. Dieser Definition schließen sich BARTSCH et al. (1990, 34) anscheinend an: „Im System der Pflanzenzelle können zwei Formen der Dynamik des Lösungsmittels unterschieden werden, nämlich Diffusion und Osmose. ... Die Diffusion durch eine Membran wird auch als ‘passive Permeation’ bezeichnet“ (vgl. LÜTTGE et al., 1988, 54).

Kurz und knapp steht bei RAVEN et al. (2000; Überschrift des Kapitels 4.3.1): „Osmose ist ein Spezialfall der Diffusion“ und ebenso gibt CAMPBELL (1997, 162) an: „Diffusion von Wasser durch eine selektiv permeable Membran ist ein Sonderfall des passiven Transportes, den man als Osmose bezeichnet.“

Auch im ‚STRASBURGER‘ (1998, 302) wird Osmose ähnlich definiert „Man versteht darunter eine Diffusion durch eine semipermeable ... Membran.“ Diese Osmose wird aber außerdem als zweiter Mechanismus der Wasseraufnahme von ausgewachsenen Pflanzenzellen bezeichnet, der erste Mechanismus soll die Quellung sein (s. 300, 303; eingehende Beschreibung s.u. in Kap. 3.9). Der – bei CZIHAK et al. (s.o.) im Zusammenhang mit Lösungsmittel verwendete – Terminus Permeation findet sich auch im ‚STRASBURGER‘ (1983, 337; bis 1998, 320) und zwar im Zusammenhang mit dem Passieren von Nährstoffionen (gemeint sind Ionen der Mineralstoffe/-salze): Man „bezeichnet den Eintritt einer *Substanz* vom Apoplasten in das Cytoplasma als Intrameation und den Transport vom Apoplasten in die Vacuole als Permeation.“

Für den Oberstufenschüler können diese Darstellungen der Fachbücher verkürzt etwa wie folgt transferiert werden (DEMME & THIES, 1979, Abschnitt 3.1.3 „Osmose“): „Die Eigenschaften der Zelle bzw. ihrer Grenzschichten, die den osmotischen Durchtritt von Molekülen zur Folge hat, wird als Permeabilität bezeichnet. Sie findet ihren Ausdruck in der Permeation (Durchdringungsvermögen) dieser Stoffe.“

Dieses Lesen von Zitaten ist ermüdend und verwirrend – wird aber als sinnvoll erachtet, denn: Ähnliches widerfährt einem Studierenden, falls er der Empfehlung folgt, mehrere Lehrbücher zur Hand zu nehmen.

Strukturierung: Auf Grund der Uneinheitlichkeit in den wissenschaftlichen Darstellungen, aber auch auf Grund der großen (größerer?) Bedeutung vieler anderer Prozesse an der Membran muss die ‚Dynamik‘ anders „angefasst“ werden, nämlich indem gefragt wird:

In welche Richtung bewegen sich die *einzelnen Wasserteilchen*?

In welche Richtung bewegen sich die *einzelnen Substratteilchen*?

Welche *Gesamtbewegungen* sind feststellbar?

Hierzu sind folgende Phänomene von den Autoren oder Lehrenden zu bearbeiten (vgl. hierzu CAMPBELL, 1997, 161f.; RAVEN et al., 2000, 86):

- ◆ Einzelne Moleküle bewegen sich immer rein zufällig und unabhängig von anderen im Raum.
- ◆ Auch im Falle eines Konzentrationsgradienten ergibt sich, dass die Teilchen (gleich welcher Sorte) unabhängig voneinander wandern.
- ◆ Im Falle eines Konzentrationsgradienten beobachtet man weiterhin, dass *insgesamt* gesehen eine Bewegung der Teilchen in die Richtung erfolgt, in der diese Teilchensorte in geringerer Konzentration vorliegt. Anders ausgedrückt: Jede Substanz diffundiert entlang ihres eigenen Konzentrationsgefälles. (Es liegen somit in einer Lösung mehrere Gradienten vor.)
- ◆ Wenn kein Gradient (mehr) vorhanden ist, dann bewegen sich die Moleküle zwar weiterhin, aber es gibt keine messbare Verschiebung von Stoffmengen, keinen Nettoflux.
- ◆ Es gibt keine Unterschiede in der Dynamik des Lösungsmittels und der gelösten Substrate. Es gibt hingegen wichtige Unterschiede, die mit der Bezeichnung (einfache) Diffusion, erleichterte Diffusion und aktiver Transport treffend beschrieben werden (z.B. KOOLMAN & RÖHM, 1994, 206).
- ◆ Diffusion geschieht prinzipiell in Gasen, Flüssigkeiten, Festkörpern; sie tritt auch an Membranen auf (vgl. auch AUDESIRK & AUDESIRK, 1996, 111).
- ◆ Bei derartiger Betrachtung ist die Einführung des Fließgleichgewichtes anzustreben.

Weiterhin: Der Begriff „Permeation“ muss neu definiert werden: Er bezieht sich entweder auf alle Stoffe, oder nur auf Stoffe außer Wasser (bzw. Lösungsmittel allgemein?) oder er ist entbehrlich.

3.5 Bewegung der Wasserteilchen durch eine Membran

Das Verständnis für osmotische Vorgänge hängt auch davon ab, welche Vorstellungen man davon erwirbt, wie es bei vorgegebenem Konzentrationsunterschied konkret (auf Teilchenebene) zu dem Nettoflux kommt.

Folgende Erklärungsmuster sind zu finden:

- ◆ Unterschiedliche Konzentration von H_2O in reinem Wasser (höhere Konzentration) bzw. in einer Lösung (geringere Konzentration) führt zu einer Tendenz/Wahrscheinlichkeit des Wanderns der Wassermoleküle in den Raum mit der geringeren Konzentration (CZIHAK et al., 1990, 59f.; LÜTTGE et al., 1994, 65; CAMPBELL, 1997, 162).
- ◆ Ein Teil des Wassers ist in Hydrathüllen der gelösten Substanz gebunden, verliert somit seine freie Beweglichkeit (AUDESIRK & AUDESIRK, 1996, 113; CAMPBELL, 1997, 162).
- ◆ Die Beweglichkeit der Wassermoleküle wird durch die gelösten Stoffe behindert (CZIHAK et al., 1990, 59f.).
- ◆ Die Häufigkeit der Stöße von Teilchen auf eine Membran ist auf beiden Seiten gleich; hieraus resultiert Wasserübertritt aus dem reinen Wasser (relativ mehr Stöße durch die Wasserteilchen) in die Lösungen (GROPENGIEBER, 1981, 33).
- ◆ Die molare freie Enthalpie des Wassers wird durch die Teilchen eines gelösten Stoffes vermindert, so dass es zu dem Nettoflux kommt (DICKERSON et al., 1978, 750).

Strukturierung: Die Konzentration von Wasser spielt eine besondere Rolle; diese muss dem Lernenden für beide osmotischen Räume verständlich gemacht werden. Z.B. stellt sich auch die Frage: Wie verändert sich das Volumen bei der Lösung von Teilchen?

3.6 Zur Diffusionsgeschwindigkeit

Wichtigste Anmerkung hierzu ist: Die Diffusionsgeschwindigkeit ist sehr klein und somit bei Flüssigkeiten ungeeignet für den Transport über größere Strecken (,STRASBURGER', 1998, 301). Sie wird durch die beiden FICKschen Gesetze beschrieben und die Wegstrecke auch beispielhaft errechnet (,STRASBURGER', 1998, 301: $s = \text{const} \cdot \sqrt{t}$ für Fluorescein in Wasser ist $\text{const} = 87$; hieraus folgt $s = 5 \text{ mm}$ in 1 h).

In der Veranschaulichung findet sich diese Kernaussage nicht immer wieder. So wird in einem Glas mit Tintentropfen, die sich zunächst als „Bodensatz“ ansammeln, bereits nach 2-3 Tagen der Farbstoff gleichmäßig verteilt vorgefunden (DEMMER & THIES, 1979; 19, Abb. 3.2; ohne Angabe der Glasgröße). Ähnlich rasch erfolgt bei BARTSCH et al. (1990; 35 u. 37) die Diffusion von 10 %igem Kaliumpermanganat: „Innerhalb von 2 Tagen vermischen sich die beiden Flüssigkeiten vollständig.“ (Unklar ist auch hierbei die Größe des Standzylinders.) Aus den o.a. Berechnungen für Fluorescein ergeben sich 44 mm in 3 Tagen als Strecke; in diesem Fall bedeutet die Aussage „Strecke“, dass diese Entfernung von Molekülen in der jeweiligen Zeit bewältigt wird (so-

zusagen als Front), nicht aber die völlige Durchmischung. (Der Versuch ist somit deswegen in der angegebenen Zeit durchführbar, da eine sehr hohe Konzentration verwandt wurde. Das Auge kann bei der hohen Farbdichte keine Unterschiede mehr wahrnehmen.)

Strukturierung: Der Sinn dieses Versuchs wird eher erfasst, wenn man einen großen Messzylinder nimmt: 500 ml; z.B. 0,2 %iges Eosin in 2molarer Rohrzuckerlösung; 10 ml unterschichten. (Beachte: Messzylinder nicht bewegen, abdunkeln, nicht an Wärmequellen aufstellen; nach etwa 4 Wochen ist bei etwa 130 mm (!) Höhe eine ganz leichte rötliche Färbung zu bemerken.)

3.7 Konzentration versus Wasserpotential

Zur Erläuterung der spontanen (exergonischen) Strömung von Wasser über eine Membran (genauer der Triebkraft) werden zwei Begriffe herangezogen: die Konzentrationsunterschiede und die Wasserpotentialdifferenz.

Eine lediglich physikalische (unanschauliche) Definition des Potentials liefern LÜTTGE et al. (1994, 65, 67). Ebenfalls wird bei CZIHAK et al. (1990, 60) zur Osmose ausgeführt: „Letztlich ist die Potentialdifferenz des Wassers die Triebkraft des osmotischen Flusses durch eine selektiv permeable Membran.“

Andere Autoren geben anschauliche Beispiele (mit Abbildungen), um Wasserstrom zu erläutern: „Der Grund für ... ständigen Wasserstrom sind Potentialdifferenzen. ... Die Faktoren, die das Wasserpotential bestimmen, sind in der Regel a) Schwerkraft, b) Druck, c) die Konzentration der gelösten Teilchen.“ (RAVEN et al., 2000, 84; vgl. auch CAMPBELL, 1997, 763ff.). Und ähnlich bei SCHOPFER & BRENNICKE (1999, 44): Das Wasserpotential wird beschrieben „als Summe von drei Teilpotentialen: Druck (P), osmotisches Potential (= osmotischer Druck, π) und Gravitationspotential ($gH_{p_{H_2O}}$)“, aber weiter in der Abb. 3.2 „Wasser strömt (z.B. durch eine selektiv permeable Membran) von einer verdünnten zu einer konzentrierten Lösung. Diesen Vorgang nennt man Osmose.“

CAMPBELL (1997, 763) stellt fest: Im Falle einer tierischen Zelle genügt es zu wissen, ob die extrazelluläre Lösung hyper- oder hypotonisch ist. Und weiter: „Bei der Pflanzenzelle beeinflusst die Zellwand jedoch die Osmose durch physikalischen Druck. Die kombinierte Wirkung dieser beiden Faktoren ... wird in dem Ausdruck Wasserpotential zusammengefasst.“

Strukturierung: Die Ausführungen zeigen, dass man bei der Erläuterung der Osmose zunächst – ohne sich künstlich Probleme mit dem Potentialbegriff zu schaffen – nur die Konzentration zu berücksichtigen braucht. Der Druck

wird erst dann wichtig, wenn es um Flüssigkeitspegel im Kapillarrohr oder um Wand-/Gewebedruck geht. Jede verfrühte Mathematisierung erschwert nur das Verständnis und lenkt vom Wesentlichen ab.

Berücksichtigt man weiterhin, welche sonstigen vielfältigen Bedeutungen der Membran vom Lernenden zu bewältigen sind, muss man festhalten, dass man mit der Konzentration und einem anschaulichen Druckkonzept (ohne den Potentialbegriff) die Vorgänge *auch* der Pflanzenzelle exakt genug beschreiben kann (so z.B. bei AUDESIRK & AUDESIRK, 1996, 110ff.). Benötigt man als Spezialist für Transporte weitere Kenntnisse, kann der Potentialbegriff dann auf Grund seiner Ausbaufähigkeit und der Theorieträchtigkeit eingeführt werden. Ansonsten belastet er nur das Lernen. (Anmerkung: Selbst beim Zellstreckungswachstum, bei dem besonders der Wanddruck beachtet werden muss, hielt z.B. CAMPBELL, 1997, 826ff., einen Rückgriff auf mathematische Betrachtungen und Formeln nicht für nötig.)

3.8 Druck/Saugkraft

Der Durchtritt von Substanzen durch Poren auf Grund des Druckes (als Kraft pro Fläche) könnte an Beispielen anschaulich einsichtig gemacht werden. Zumindest könnte man auf dieser Ebene diskutieren, dass der Druck der Wassersäule in einem System, wie es seit Jahren (letztmals 1998, Abb. 31.1b) 1-3) in dem ‚LINDER‘ abgebildet wird, keineswegs dem osmotischen Druck entspricht. Der Wassereinstrom in die Blase (vgl. die anschauliche Beschreibung auf 32) kommt dann zum Stillstand, wenn der hydrostatische Druck und der ‚Wand‘druck der verwendeten elastischen Schweinsblase (zusammen) genau so viele Wassermoleküle hinauspressen, wie durch die Diffusion hineingelangen. Analog wird der Wanddruck bei der Beschreibung des ‘osmotic pressure‘ bei AUDESIRK & AUDESIRK (1996, 114f.) vernachlässigt, obwohl kurz zuvor (113) der Druck auf die Wand des Modellsackes anschaulich beschrieben wird.

Der früher oft verwendete Ausdruck „Saugkraft der Zelle“⁴, auch mathematisch als Saugkraft(-spannungs-)gleichung formuliert, wird in den Fachbüchern fast ausnahmslos ersetzt durch das „Druckkonzept“. In Sekundarstufen II-Büchern (sowie evtl. auch im Sprachgebrauch der Lehrenden?) ist der lebensweltliche, anschauliche Begriff (Säuglinge saugen!) für die Wasseraufnahme (sic!) noch vorhanden: „... so wird aus den Hohlräumen der Zellwand Wasser aufgenommen: in der Zelle besteht eine Saugspannung. Die Saugspannung

⁴ ‚STRASBURGER‘, 1991, 322: „...nur die Differenz zwischen dem potentiellen Quellungsdruck und dem Wanddruck (P) (*bestimmt*) das jeweilige Gesamtwasserpotential der Zelle, das als Saugkraft dem Medium gegenüber wirksam ist.“

hängt direkt von der Konzentration des Zellsaftes ... ab“ (LINDER', 1983, 131; bzw. 1998, 51) oder auch KNODEL, 1979, 32: „Übung 11: Saugspannung pflanzlicher Gewebe“.

Strukturierung: Es spielen Sprachgewohnheiten eine Rolle, die lebensweltlich sinnvolle Erklärungen bereithalten, die aber im Zusammenhang mit wissenschaftlichen Konzepten zu Missverständnissen führen können: „Der Mensch *nimmt* Nahrung *auf*.“ oder „Die Pflanze *nimmt* Wasser *auf*.“ ‚Saugkraft‘ und ‚Wasseraufnahme‘ sind im Zusammenhang mit der Teilchenvorstellung sowohl als Begriff wie als Terminus zu ersetzen.

3.9 Quellung

Unter Quellung versteht man die Flüssigkeitsaufnahme eines Quellskörpers (meist eines hochmolekularen Systems, wie z.B. Zellulose) unter Volumenvergrößerung. Sie geht auf die Anlagerung von Wasser an hydrophile Gruppen (Hydratation), auf Grund der Dipolstruktur und auf Kapillareffekte zurück (CZIHAK et al., 1990, 61; RAVEN et al., 2000, 88; STRASBURGER', 1998, 301).

Während bei RAVEN et al. und CZIHAK et al. dieser Abschnitt im Zusammenhang mit Diffusion und Osmose nur knapp ausfällt, nimmt er im STRASBURGER' seit jeher (zumindest seit 1962) einen großen Raum ein: „Die Quellung ist nun aber nicht die einzige Erscheinung, die bei der Wasseraufnahme in die Pflanzenzelle eine Rolle spielt“, worauf die Diffusionserscheinungen besprochen werden (a.a.O. 190). Die neueste Auflage (1998, 300) könnte das Missverständnis eines besonderen Mechanismus' der Wasseraufnahme *in die Zelle* durch Quellung noch begünstigen: „Die Pflanze ... nimmt das Wasser auf zweierlei Weise auf, einmal durch Quellung und zum anderen auf osmotischem Wege.“ Nach dem Besprechen der Quellung folgen Hinweise auf Pflanzen, die besondere Vorrichtungen „entwickelt“ haben, unter extremen Bedingungen Wasser aufzunehmen (1998, 197ff.): Aber auch bei den genannten Epiphyten ist im Velamen, bei Urnen und Absorptionshaaren die Wasseraufnahme *in die Zelle* ein osmotischer Vorgang.

Offensichtlich spielen auch hier die o.a. Sprachgewohnheiten eine Rolle. Sätze wie „Die Pflanze nimmt Wasser auf.“, „Der Mensch nimmt Nahrung auf.“, „Die Verdauung findet im Körper statt.“ zeigen, dass nicht präzise genug der Ort der Aufnahme angegeben wird: Ist die Wand oder das Zellinnere der Ort der Aufnahme, ist der Darm (Außenwelt!) oder der Körper selber (die Zellen) gemeint. Prinzipiell geht es hierbei um die Unterscheidung von zwei verschiedenen Innen-/Außen-Konzepten, nämlich einem lebensweltlichen und einem wissenschaftlichen (vgl. hierzu auch „Innen/Außen“ bei GROPPENGIEBER,

1998, 312ff.). Analoges gilt auch für die Vakuolen, die je nach wissenschaftlichem Konzept zur Außenwelt („Abfalleimer“; Absonderungsprodukt des Protoplasten in ‚Strasburger‘, 1983, 71, auch 14: Tonoplast) oder zum Protoplasten („Mischgefäß“; sie erweisen sich „als den Lysosomen tier. Zellen analoge Kompartimente“, HERDER; Bd. 8, 305) gerechnet werden.

Strukturierung: Quellung ist eine Erscheinung, die unabhängig von Membranen und unabhängig vom ‚Leben‘ abläuft. Eine Verknüpfung mit der Diffusion oder der Osmose ist nur insofern gegeben, als durch diese beiden Vorgänge ein Wassertransport zu den Quellkörpern erfolgt, das Wasser dort gebunden, also aus dem osmotisch wirksamen Wasserpotential entfernt wird (s. Fußnote bei CAMPBELL, 1997, 162). Man kann somit auf die Beschreibung der Quellung⁵ im Zusammenhang mit der Osmose verzichten. Stattdessen sollte man „Außen“ und „Innen“ klar voneinander trennen (vgl. z.B. AUDESIRK & AUDESIRK, 1996, 107ff.; sehr klar bereits unterschieden bei PFEFFER, 1881, 39ff.).

4 Schlussfolgerungen für ein vorläufiges Basiskonzept

Der Begriff Diffusion gilt für alle Teilchenbewegungen. Als Permeation ist die Diffusion (der Durchtritt) von Teilchen (aller Art) durch eine Membran zu verstehen; man kann (aus historischen Gründen) den Durchtritt von Wasser als Osmose bezeichnen, unbedingt nötig ist der Terminus aber nicht. Bedeutsam sind die Begriffe passiv und aktiv, die dann zu Diffusion und Carrier in Beziehung gesetzt werden müssen.

Die Termini Plasmalemma und Tonoplast können bei dem Basiskonzept entfallen; auch PFEFFER (1881) hat nur von Plasmamembranen (oder auch Hyaloplasmahäutchen; 32, 38, 41) gesprochen. Falls aber die Kompartimentierung von Vakuole und Protoplasma z.B. zum Verständnis der Trennung von verschiedenen Substraten oder von Enzym und Substrat (siehe z.B. die Naturstoffe) ausführlicher bearbeitet wird, könnte man die Terminologie erweitern.

Entfallen kann die ‚originale‘ PFEFFERSche Zelle, da sie im Experiment wegen der schwierigen Herstellung und Handhabung ohnehin kaum noch verwendet wird und zweitens als Modell heutigen Vorstellungen zu Membran und Protoplasma nicht mehr entspricht bzw. nur noch minimale Information hierzu

⁵ Es sei darauf hingewiesen, dass z.B. bei HOFMEISTER (1867) und bei PFEFFER (1881) umfangreiche Darstellungen zur Imbibition und Quellung erfolgten. Diese „Forschungsansätze“ sind nur aus der damaligen Zeit zu verstehen: Beginn der Kenntnis über den von PFEFFER definierten Protoplasten.

beiträgt. Als Ersatz kann das Osmometer nach BARTSCH et al. (1990) dienen, u.U. verbessert durch das Ineinanderfügen von *zwei* Dialysierschläuchen, um den Protoplasten adäquater abzubilden.

Ohne Mathematisierung ist Diffusion und Osmose in ihrer Kernaussage als statistischer Vorgang auf Teilchenebene zu deuten und zu verstehen. Die Einführung des Wasserpotentials (statt der Konzentrationen) ist bei der Erarbeitung des Basiskonzeptes, das für Tier **und** Pflanze gilt, eher hinderlich. Bei der theoretischen Erweiterung ist der Druck einer Wassersäule oder der Wanddruck der Pflanzenzelle (wie auch der Bakterien- und Pilzzelle!) anschaulich und zeitsparend mit Hilfe des Teilchenmodells, der Membranporen und einer erläuternden Skizze des Druckes (vgl. RAVEN et al., 2000 oder CAMPBELL, 1997) ohne mathematische Formeln darlegbar.

5 Ausblick

Trotz der umfangreichen Darstellung der Vorgänge in den Lehrbüchern bleiben erstaunlicherweise interessante Fragen offen:

- ◆ Es bedarf noch der Aufklärung, ob es andere als historische Gründe dafür gibt, dass der Wassertransport derart umfangreich diskutiert wird.
- ◆ Gibt es in Pflanzen am Standort tatsächlich Plasmolyse? Einziger Hinweis bei GÜNZLER (1977); auch bei CAMPBELL (1997, 164), wo aber nicht zu entscheiden ist, ob ‚in vivo‘ oder ‚in vitro‘ gemeint ist.
- ◆ Kann Wasser bei Trockenheit aus den Wurzelhärchen in den Boden fließen?
- ◆ Hat die schwierige Wasserversorgung im Winter bei Temperaturen um den Gefrierpunkt mit der Diffusion zu tun? Auswirkungen? (Hinweis bei GÜNZLER, 1977).
- ◆ Zur Plasmolyse: Was befindet sich im Raum zwischen Wand und Plasmalemma? Hinweis nur bei SCHARF & WEBER (1997, 34).
- ◆ Was ereignet sich beim Zellwachstum durch Wasseraufnahme in den Zellwänden (Problem der Festigkeitsveränderungen; ‚Extensin‘)?
- ◆ Für die Sekundarstufe II stellt sich die Frage, ob nicht die Bearbeitung von Diffusion und Osmose im Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt der Pflanze zu einseitigen Vorstellungen führt, wie bereits GÜNZLER (1977, 139) betont. Osmotische Prozesse im Blut, Meerwasserentsalzung (GÜNZLER, 1977, 142ff.), aber auch Dialyse (STEINHEIL, 1996) sind wesentliche(re?!) Probleme, die auch mit diesen Prinzipien angegangen werden können.

Zitierte Literatur

- AUDESIRK, T. & G. AUDESIRK (1996): *Biology: Life on Earth*. 4. Aufl., Prentice Hall, New Jersey.
- BARTSCH, A., F. RÜTHER & R. TOONEN (1990): Die PFEFFERSche Zelle: Realität und Modell. *UB* **14** (160), 34-37.
- BAUER, E. & A. BOSSLER (1980): *Die Zelle*. Cornelsen, Berlin.
- BERCK, K.-H. (1999): *Biologiedidaktik: Grundlagen und Methoden*. Quelle & Meyer, Wiebelsheim.
- CAMPBELL, N. (1997): *Biologie*. Spektrum, Heidelberg.
- CZIHAK, G., H. LANGER & H. ZIEGLER (Hrsg., 1990): *Biologie*. 4. Aufl. Springer, Heidelberg.
- DEMMER, G. & M. THIES (1979): Stoffwechsel. In: KNOLL, J. [Hrsg.]: *westermann-colleg Biologie*. Westermann, Braunschweig.
- DICKERSON, R.E., H.B. GRAY & G.P. HAIGHT (1978): *Prinzipien der Chemie*. de Gruyter, Berlin.
- DUDEL, J. (1995): Innerneurale Homeostase und Kommunikation, Erregung. In: SCHMIDT, R. F. [Hrsg.]: *Neuro- und Sinnesphysiologie*. 2. Aufl. Springer, Berlin.
- GROPENGIEßER, H. & U. KATTMANN (1998): Lebensweltliche Vorstellungen im Biologieunterricht. In: BAYRHUBER, H. et al. [Hrsg.]: *Biologie und Bildung*. IPN **166**, Kiel, 311-315.
- GROPENGIEßER, H. (1981): Vom Original zum Modell – Modellentwicklung am Beispiel Osmose. *UB* **5** (60/61), 28-33.
- GÜNZLER, E. (1977): Versuche zur Osmose. *NiU-B* **25**, 139-143.
- HÄUBLER, P. et al. (1998): *Naturwissenschaftsdidaktische Forschung: Perspektiven für die Unterrichtspraxis*. IPN, Kiel.
- HERDER (1994): *Lexikon der Biologie*, Bd. 8. Spektrum, Heidelberg.
- HOFMEISTER, W. (1867): *Die Lehre von der Pflanzenzelle*. Handbuch der physiologischen Botanik (Erster Band, erste Abtheilung). Engelmann, Leipzig.
- KATTMANN, U. (1992): Von der Macht der Namen: Was mit biologischen Fachbegriffen gelernt wird. In: ENTRICH, H. & L. STAECK [Hrsg.]: *Sprache und Verstehen im Biologieunterricht*. Leuchtturm-Verlag, Alsbach, 91-101.
- KOOLMAN, J. & K.-H. RÖHM (1994): *Taschenatlas der Biochemie* Thieme, Stuttgart.
- “LINDER“ *BIOLOGIE* (BAYRHUBER, H. & U. KULL) [Hrsg. 1998]: *Lehrbuch für die Oberstufe*. 21. Aufl., Schroedel, Hannover (sowie 20. Aufl., 1989, 19. Aufl., 1983, 18. Aufl., 1978).
- LÜTTGE, U., M. KLUGE & G. BAUER (1994): *Botanik*. 2. Auflage. Wiley-VCH, Weinheim.
- PFEFFER, W. (1881): *Pflanzenphysiologie*. Ein Handbuch des Stoffwechsels und Kraftwechsels in der Pflanze. (Erster Band. Stoffwechsel). Engelmann, Leipzig.
- RAVEN, P., R. EVERT & S. EICHHORN (2000): *Biologie der Pflanzen*. 3. Aufl., de Gruyter, Berlin.
- SCHARF, K.-H. & W. WEBER (1997): *Cytologie*. Schroedel, Hannover.
- SCHOPFER, P. & A. BRENNICKE (1999): *Lehrbuch der Pflanzenphysiologie*. 5. Aufl., Springer, Berlin-Heidelberg-New York.
- STEINHEIL, U. (1996): Die Dialyse. *PdN-B* **45** (4), 30-34.
- “STRASBURGER“ (neubearb. von HARDER, R., FIRBAS, F., SCHUMACHER, W. & D. v. DENFFER, 1962): *Lehrbuch der Botanik*. 28. Aufl., Fischer, Stuttgart. Neubearb. von v. DENFFER, D., EHRENDORFER, F., MÄGDEFRAU, K. & H. ZIEGLER, 1978: 31. Aufl.; Neubearb. von v. DENFFER, D., ZIEGLER, H., EHRENDORFER, F. & A. BRESINSKY, 1983: 32. Aufl.; Neubearb. von SITTE, P., ZIEGLER, H., EHRENDORFER, F. & A. BRESINSKY, 1991, 1998: 33. bzw. 34. Aufl.

Verfasser: Prof. Dr. M. Hesse, Institut für Didaktik der Biologie, Fliednerstr. 21, 48149 Münster; Fax: 0251-83-31330; hessema@uni-muenster.de